

# 济阳坳陷沾化凹陷沙一下亚段优质烃源岩成因分析

宫红波<sup>1)</sup>, 孙耀庭<sup>2)</sup>, 刘静<sup>3)</sup>, 李辉<sup>3)</sup>

1) 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东东营, 257015; 2) 滨州学院建筑工程学院, 山东滨州, 256600; 3) 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营, 257015

**内容提要:** 沾化凹陷发育沙四上亚段、沙三下亚段和沙一下亚段 3 套烃源岩, 前人对沙一下亚段烃源岩未进行深入研究。本文利用有机地球化学方法对沾化凹陷沙一下亚段烃源岩品质进行分析, 研究表明沙一下亚段烃源岩有机质丰度高、干酪根类型以 I 型为主, 为优质烃源岩; 烃源岩沉积中心位于渤南洼陷, 但孤南洼陷烃源岩品质最好。孤北洼陷和孤南洼陷的部分烃源岩达到大量排烃阶段, 所以勘探开发研究应重视来自沙一下亚段烃源岩的贡献。沉积环境分析表明, 沙一下亚段沉积期沾化凹陷构造沉降速率较小, 气候为北亚热带至暖温带中等偏干旱气候, 均不支持形成优质烃源岩。沙一下亚段高品质烃源岩的形成的高盐度导致湖泊的高生产力和良好的水体分层。湖盆高盐度是由于鲁佩期的海侵导致, 海侵沿孤南洼陷—孤北洼陷—渤南洼陷的方向推进, 导致孤南洼陷虽然不是沉积、沉降中心, 但烃源岩品质最好。

**关键词:** 优质烃源岩; 沙一下亚段; 沉积环境; 古气候; 海侵; 沾化凹陷

进入 21 世纪以来, 湖相烃源岩研究取得巨大进展, 石油地质工作者意识到对油气藏做出贡献的只有少量优质烃源岩, 这些烃源岩往往厚度不大(通常 <50 m), 但是有机质丰度高、类型好, 具有较高的生烃潜力和排烃强度(张林晔等, 2003; Hao Fang et al., 2009)。受构造运动和古气候的共同控制, 济阳坳陷古近系经历了多个沉积旋回(鄢继华等, 2007), 发生过多次湖侵过程, 形成沙四上亚段、沙三下亚段和沙一下亚段等烃源岩富集层段, 岩性以深湖相页岩、油页岩和纹层泥岩为主, 具有较强的沉积韵律性(李丕龙, 2004)。不同烃源岩层的分布和质量存在很大差别。前人对沙四上亚段和沙三下亚段成熟烃源岩地球化学特征、生烃演化过程和沉积环境进行了较为详细的研究, 陈中红等(2004)对东营凹陷沙三段烃源岩品质进行了系统分析, 认为湖盆的旋回式沉积及湖平面的波动性变化导致了沙三段烃源岩强烈的非均质性, 钟建华等(2015)通过恢复三角洲前积层的高度, 表明东营凹陷古近纪沙三期为深水沉积环境。而沙一下亚段烃源岩由于成熟度较低, 对油气的供给作用未予以足够重视, 研究尚不系统、深入, 制约了沙一段及其上部层系油气成藏的认识。本文从矿物组成、地球化学特征分析入

手, 对济阳坳陷沾化凹陷沙一下亚段烃源岩形成条件进行了深入分析, 为沾化凹陷浅层勘探提供了有益补充。

## 1 区域地质概况

沾化凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的东北部, 西北侧以义和庄凸起和埕东凸起与车镇凹陷相隔, 南侧以陈家庄凸起与东营凹陷相连, 东侧以长堤—孤东潜山和垦东凸起与渤中坳陷相连, 凹陷内包括渤南洼陷、孤北洼陷和孤南洼陷等多个负向构造单元和孤岛凸起 1 个正向构造单元, 总体上呈 NEE 走向, 为北断南超的箕状断陷构造格局, 面积约 3800 km<sup>2</sup>。沾化凹陷以太古界为结晶基底, 在元古代、古生代和中生代为地台盖层沉积阶段, 经燕山运动二幕发生的强烈断裂变动后, 开始进入盆地发育阶段(李伟等, 2006)。新生代古近纪为箕状断陷盆地, 新近纪为断裂活动较弱的坳陷盆地。

沙一下亚段位于渐新统(沙二上—东营组二级层序)下部, 与下伏沙二上亚段地层呈整合接触, 地震剖面上为为一组中振幅、高连续的反射相位; 沙一下亚段呈北厚南薄、东厚西薄的特征, 沉积厚度 50~200 m, 分布范围达 1200 km<sup>2</sup>。钻井剖面上, 底部

注: 本文为国家重大专项(编号: 2011ZX05006-003)的成果。

收稿日期: 2018-09-08; 改回日期: 2019-03-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.03.009

作者简介: 宫红波, 男, 1980 年生, 硕士, 工程师, 矿产普查与勘探专业, Email: gonghongbo.slyt@sinopec.com。通讯作者: 孙耀庭, 男, 1978 年生, 高级工程师, 主要从事石油地质综合研究, Email: syt1979@sina.com。

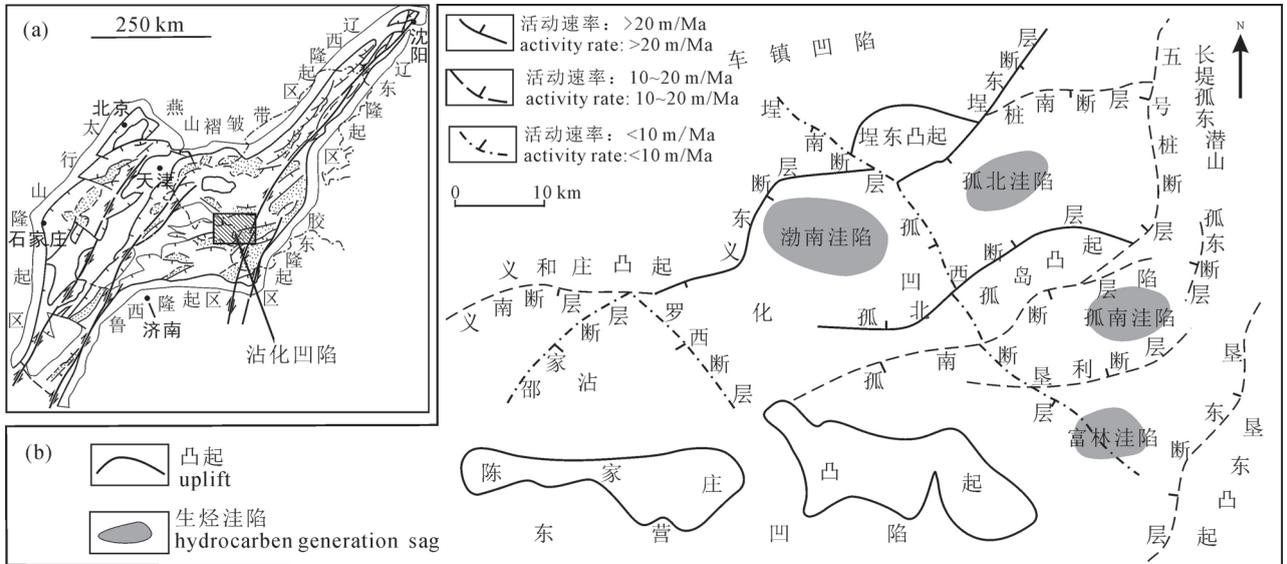
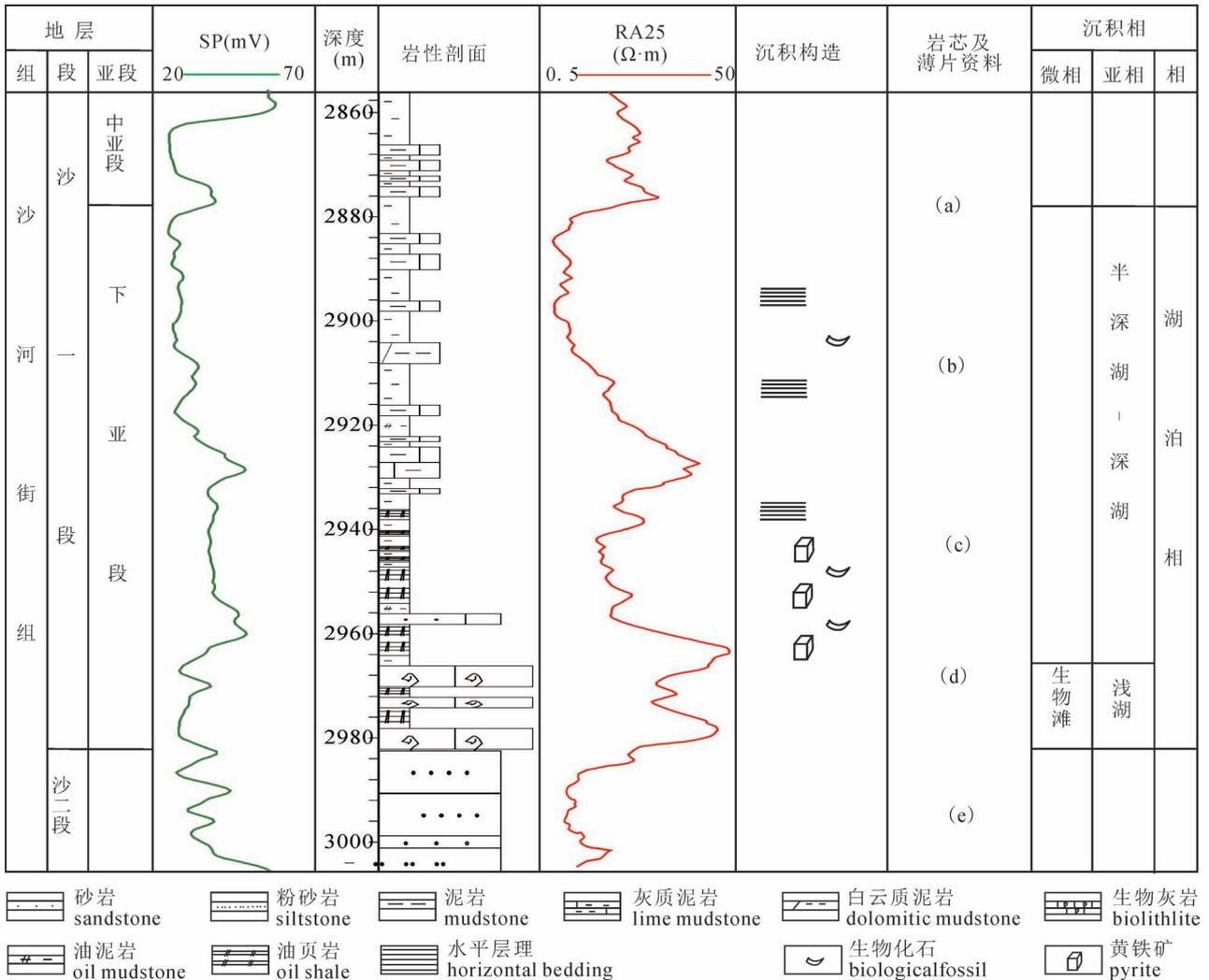


图 1 济阳坳陷沾化凹陷区域位置、构造格局及沙一段生烃洼陷发育特征

Fig. 1 Location and tectonic framework of the Zhanhua Sag, Jiyang Depression



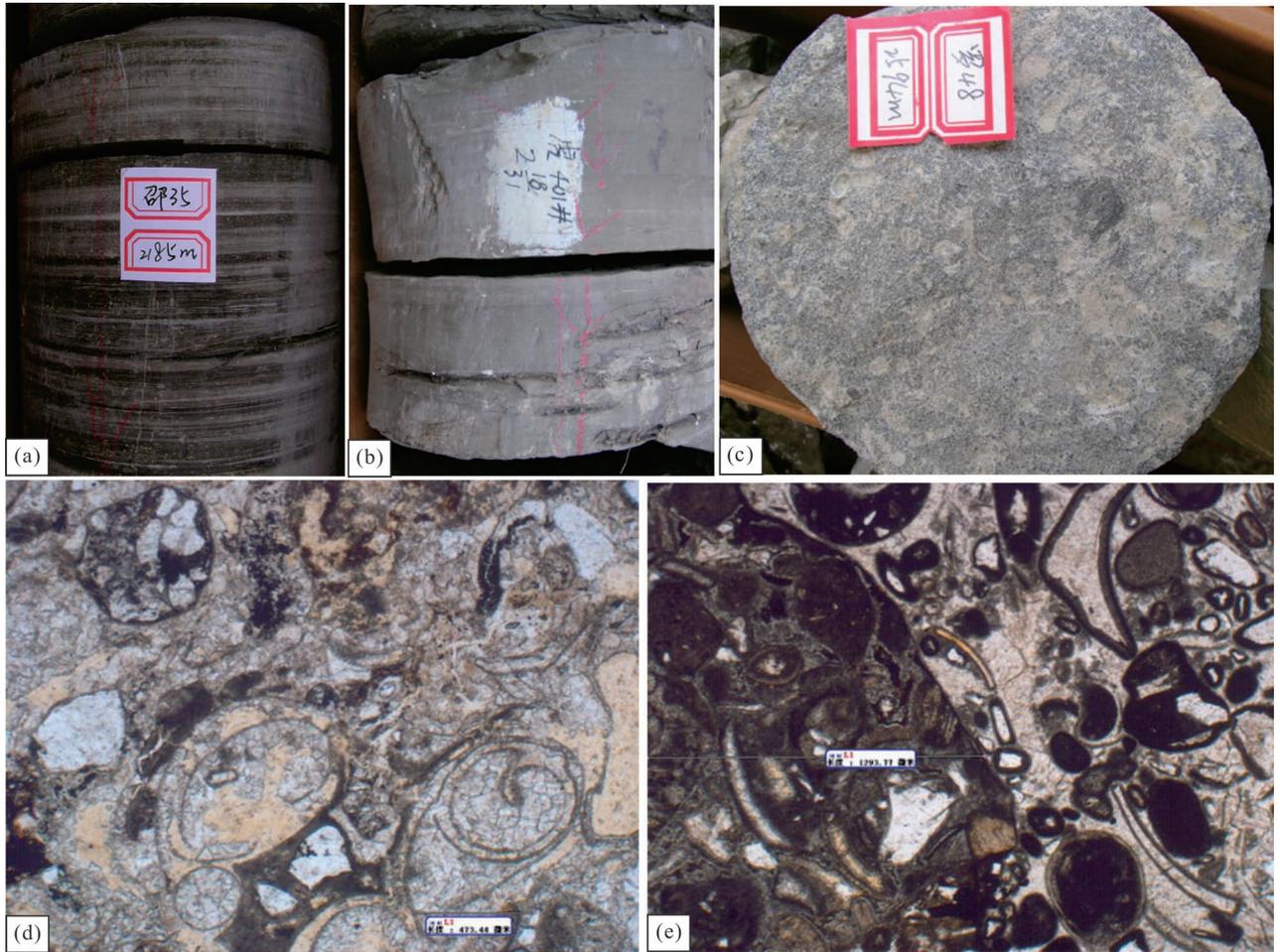


图2 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段(古近系沙河街组一段下亚段)地层综合柱状图及相应层位岩芯或薄片特征

Fig. 2 Integration stratigraphic column and cores or slices of the the lower Es<sup>1</sup>(the 1st Member of the Eocene Shahejie Formation) in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

岩性为薄-中厚层灰黄色白云岩、灰色灰岩、生物灰岩与油页岩互层,向上过渡为深灰色泥岩与深灰色、褐灰色泥岩互层(图2),含有大量介形虫、微小腹足类和微小薄壳双壳类等实体化石(张存霞,2015);测井曲线特征表现为自然电位曲线较平直,底部可见不规则的低幅度鼓包负异常(罗群和卫建荣,2008),视电阻率曲线由上往下逐步抬高,底部电阻为高阻尖峰的“剪刀电阻”。

## 2 烃源岩特征

### 2.1 烃源岩分布特征

沙一下亚段为油页岩与油泥岩互层,夹薄层白云岩,白云质泥岩,是一套优质烃源层,有机质丰度高,成熟度低,通过对146口井钻遇烃源岩的厚度进行统计表明,沙一下亚段烃源岩厚度一般在20~140 m,沉积中心位于义东断层和埕东断层下降盘,最大

厚度>140 m(图3),孤南—富林洼陷最大厚度>80 m。根据对孤南137、义深9、桩25等井岩芯观察表明,沙一下亚段油页岩页理发育,它是由白云岩、白云质泥岩、灰色泥岩等不同岩性组成的韵律层。这些页岩的页理由颗石藻层组成,层厚0.1~0.5 mm。在孤南洼陷发现的渤海网窗石(*Reticoloffenestras bohaiensis*),个体小,种类少,与黄铁矿共生,说明颗石藻在陆相湖盆的闭塞环境中发生了变异现象(王广利,2010),颗石藻层与暗色泥质层呈水平纹层状互层,反映水体非常平静,湖水能量很弱。

### 2.2 烃源岩地球化学特征

#### 2.2.1 有机质丰度

本次研究对渤南洼陷、孤北洼陷、孤南洼陷和富林洼陷钻遇的沙一下亚段烃源岩进行采样分析(其中渤南洼陷102块,孤北洼陷79块,孤南洼陷87块,富林洼陷46块),分析在中国石化股份公司胜



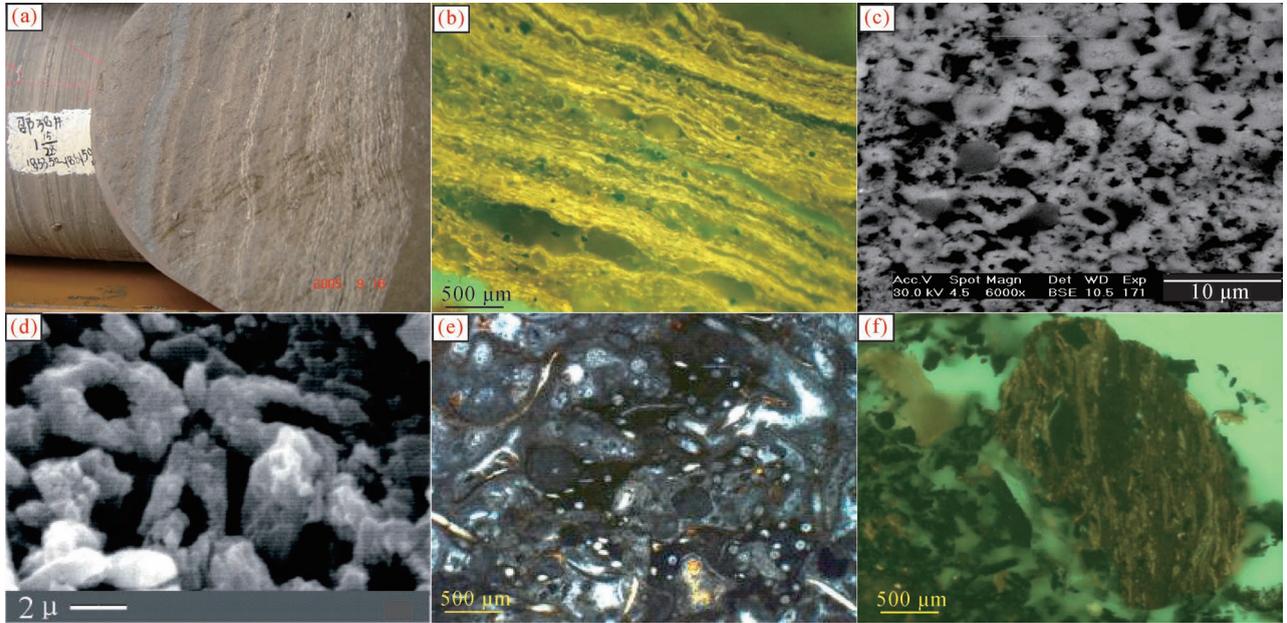


图4 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段烃源岩有机岩石学特征

Fig. 4 Organic petrology characteristics of hydrocarbon source rocks in the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

(a) 油页岩有机质纹层, (邵38井, 1854.3 m); (b) 层状藻, (孤南27井, 2157.5 m, ×100, 单偏光); (c) 渤991井, 2848.5 m, ×40, 单偏光); (d) 钙质页岩中的颗石藻, (渤991井, 2848.5 m, ×100, 单偏光); (e) 海松藻(老9井, 3010.5 m, ×40, 单偏光); (f) 藻类及壳质组分有弱荧光, 成熟度低于1.0% (孤南29井, 2660.3 m, ×100, 单偏光)

(a) Organic lamina in oil shale, the Well Shao-38, 1854.3 m; (b) stratiform algae, the Well Gunan-27, 2157.5 m, ×100, plane polarized light; (c), (d) coccoliths in calcareous shale, the Well Bo-991, 2848.5 m, (c) ×40 plane polarized light, (d) ×100, plane polarized light; (e) codiaceae, the Well Lao-9, 3010.5 m, ×40, plane polarized light; (f) algae and the exinite has weak fluorescence, maturity less than 1.0%, the Well Gunan-29, 2660.3 m, ×100, plane polarized light

石, 这些颗石即形成钙质超微化石。沾化凹陷沙一下亚段发育数个颗石藻化石纹层(图4c)。颗石藻类是现代海洋初级生产力的重要组成部分之一, 其在水体中生产的一种最显著的方式就是“勃发”。所谓“勃发”就是藻类在一定的条件下, 在一定的时期可以形成单种的极度生长、富集。颗石藻勃发对于生油岩的形成有重要的作用, 颗石藻可以在低温条件下, 无须达到通常的生油门限温度, 即可生成大量烃类。

运用透射光荧光分析手段, 对沾化凹陷沙一下亚段96个样品进行镜下观察分析表明, 有机显微组分以腐泥组、壳质组为主, 腐泥组加壳质组相对含量大于80%, 其中以结构藻类体分布较多, 镜下见有海松藻(图4e)、盘星藻等, 藻类及壳质组分绝大多数发弱荧光(图4f), 见少量孢粉体为松粉及被子类花粉, 为黄色荧光, 镜质组含量较低, 一般呈灰色至灰黑色无荧光, 少数具暗褐色荧光, 烃源岩类型指数大部分在75~92, 有机质类型好, 为I~II<sub>1</sub>型干酪根, 沙一下亚段烃源岩成烃母质以低等水生生物为

主, 有机质类型主要为腐泥型至腐殖腐泥型(表2), 有机质方式以富集层方式保存(苗建宇等, 2003; 王冠民等, 2005a), 具有极好的生油潜力。孤南洼陷有机质类型明显较其它洼陷好, 以腐殖腐泥型混合有机质为主, 具有极好的生烃能力。

### 2.2.3 有机质成熟度

干酪根热降解生烃理论为烃源岩的生油气远景评价提供了科学的理论依据, 镜质体反射率 $R_o$ 是评价有机质成熟度最为有效的指标, 不同类型干酪根具有不同化学结构, 沾化凹陷沙一下亚段烃源岩以I型干酪根为主, 成熟度阶段划分按照 $R_o < 0.5\%$ 为未成熟阶段,  $0.5\% < R_o < 0.7\%$ 为低成熟阶段;  $0.5\% < R_o < 1.3\%$ 为成熟阶段(生油高峰期)。

利用伊利石结晶度和绿泥石化学成分可以反演其形成时的古地温及古地温梯度(邱楠生等, 2004; 柳忠泉等, 2008), 分别对渤南洼陷的义深9井、孤北洼陷的桩25井和孤南洼陷的孤南132井中伊利石结晶度和绿泥石化学成分的形成深度及其温度资料进行, 得到渤南洼陷古地温梯度为 $3.50^\circ\text{C}/100$

表 2 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段烃源岩有机组分特征

Table 2 Characteristics of hydrocarbon source rocks organic components in the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

烃源岩类型	黄铁矿 (%)	腐泥组 (%)	壳质组		镜质组			惰质组	
			孢子体 (%)	角质体 (%)	富氢镜质体 (%)	镜质体 (%)	半镜质体 (%)	半丝质体 (%)	丝质体 (%)
孤南洼陷	3.3~4.5 3.8	55.6~83.8 69.1	3.3~5.7 4.2	4.6~6.9 6.3	3.6~10.5 7.5	2.3~8.4 6.1	1.6~3.7 3.0	/	/
孤北洼陷	1.9~3.6 2.7	45.4~79.3 65.2	4.5~5.0 4.7	5.3~8.0 6.9	3.9~11.4 7.7	5.5~8.6 7.2	1.6~4.4 3.2	1.1~2.2 1.8	0.4~0.7 0.6
渤南洼陷	2.2~4.2 3.1	46.7~80.6 64.3	4.2~5.2 4.8	4.5~9.0 6.5	3.7~12.3 8.1	5.2~9.6 7.5	1.8~4.9 3.5	1.1~2.0 1.7	0.1~0.8 0.5

注:  $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ , “/”表示未检测到数据

m, 孤南洼陷古地温梯度为 3.80 °C/100 m, 孤北洼陷古地温梯度为 3.70 °C/100 m。由于沾化凹陷钻井实测  $R_o$  数据较少, 在地温梯度分析基础上展开了盆地数值模拟计算求取  $R_o$  值, 计算  $R_o$  值与钻井实测  $R_o$  值误差较小, 所以可以用盆地模拟计算  $R_o$  值近似代替钻井实测  $R_o$  值, 在此基础上获得沙一下亚段烃源岩  $R_o$  平面分布图(图 5)。由图 5 可见, 邵家洼陷、富林洼陷沙一下亚段烃源岩  $R_o < 0.5$ , 烃源岩未成熟; 渤南洼陷、孤北洼陷和孤南洼陷沙一下

亚段烃源岩  $R_o > 0.5\%$ , 已进入低熟阶段, 其中孤北洼陷和孤南洼陷部分烃源岩已进入进入生烃高峰阶段( $R_o > 0.7\%$ ), 目前在孤北洼陷和孤南洼陷周边已发现来自沙一下亚段烃源岩生成的油气, 也说明了这一点。

### 2.3 生烃特征研究

沙一下亚段为水进体系域下沉积的一套主要由钙质纹层页岩和深灰色泥岩组成的优质烃源层。沙一段甾类分子化石丰富, 甾烷/藿烷为 0.59~0.98。

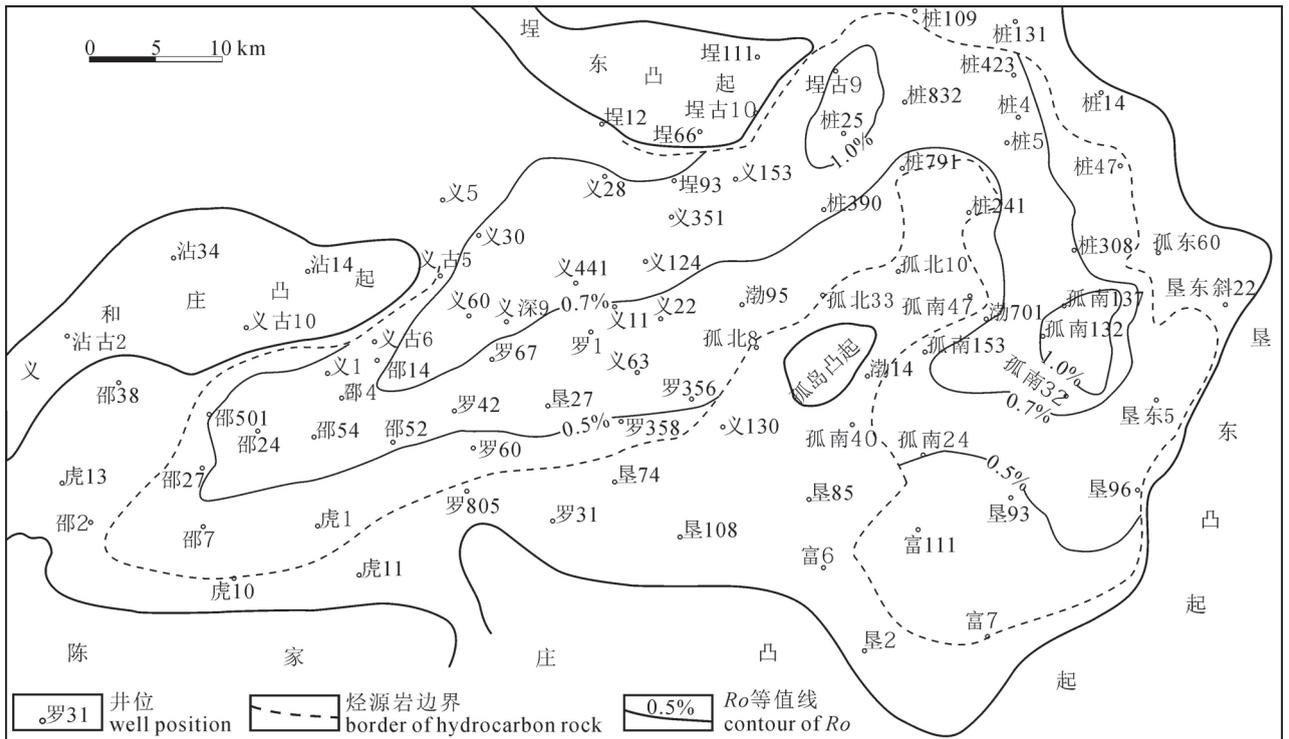


图 5 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段烃源岩  $R_o$  分布特征

Fig. 5  $R_o$  distribution of hydrocarbon source rocks in the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

24-降胆甾烷发育, NCR 高达 0.93~0.98;  $C_{28}$  甾烷占规则甾烷的 25%~48%, 平均为 31%,  $C_{29}$  4-甲基甾烷占  $C_{28}$ ~ $C_{30}$  4-甲基甾烷的 29%~67%, 平均为 41%, 甲藻甾烷占  $C_{30}$  甲基甾烷的 43%~78%, 平均为 62%, 三芳甲藻甾烷为 48%~74%, 平均为 66%。未成熟样品中不仅有“4 $\alpha$ -”构型的甲藻甾烷, 还有“4 $\beta$ -”构型, 甚至检测到了  $C_{31}$  4-甲基甾烷, 它们来源于沟鞭藻或颗石藻的贡献。钙质纹层页岩在肉眼下即可显示出浅色层和暗色层相间的特征, 在扫描电镜下进一步观察发现它实际上是由钙质超微化石纹层和富含沟鞭藻化石的有机质纹层组成(王广利, 2010)。DBT/P 和 Pr/Ph < 1, 为强还原和贫硫的环境。 $\gamma$  蜡烷十分发育(图 6),  $\gamma$  蜡烷/ $C_{30}$  藿烷为 0.17~0.78, 反映出水体的咸化和分层;  $T_s$  丰度低,  $T_s/T_m$  小于 0.8, 此外还发育  $C_{26}$  甾烷(孙耀庭等, 2015b),  $C_{29}$  甾烷 20S/(20S+20R) 值小于 0.32, 以形成低熟油为主。 $C_{31}$ ~ $C_{35}$  17 $\alpha$ -藿烷丰度呈阶梯式下降, 且  $C_{35}$  <  $C_{34}$  藿烷, 为半咸水还原沉积环境产物(罗群和卫建荣, 2008)。

相比于沙四上亚段和沙三下亚段, 沙一下亚段是沾化凹陷古生产力最高的层段, 生烃潜力大, 但沾化凹陷大多处在未成熟-低成熟阶段, 在孤北洼陷和孤南洼陷见到成熟烃源层, 其既可以生成低熟油(陈建渝等, 2002), 也可以生成成熟油, 既可以单独成藏, 也可以与来源于其它烃源层的油气形成混源油气藏, 应引起勘探开发工作者的足够重视。

### 3 烃源岩成因分析

#### 3.1 构造演化条件

对于陆相断陷盆地而言, 构造运动尤其是断裂

活动控制着盆地古地理面貌, 决定着盆地蓄水空间的形成与消亡, 是湖盆形成的决定性因素(刘培等, 2013)。济阳拗陷构造演化具有多幕裂隙、多旋回叠加的特征, 北北东向断层在古近纪的开始活动时间是沙四期或沙三期(方旭庆等, 2013), 从早至晚具有活动性减弱的变化规律, 多在沙一期出现活动性增强的现象(彭存仓, 2009), 义东断层活动速率达 100 m/Ma, 埕东断层活动速率达 85 m/Ma(图 1), 烃源岩沉积中心位于义东断层和埕东断层下降盘, 说明其发育明显受到这 2 条断层的控制。在区域伸展环境下, 裂陷期的快速沉降和较低的欠补偿环境, 为形成半深水-深水湖盆提供了条件, 也有利于有机质的保存, 形成优质烃源岩。

#### 3.2 古气候条件

沾化凹陷古近纪的微体化石中, 对气候反映最敏感的是孢子和花粉(孢粉)。通过孢粉化石的统计、分析, 可以恢复当时的植物群面貌, 进而恢复古气候(李守军等, 2003)。因为在不同研究阶段采用的地层划分系统和孢粉(植物)的环境分类有所不同, 对各个时期古气候的认识观点也有分歧。根据孢粉母体植物对气温的适应性, 分为喜热组、喜温组和广温组, 利用喜热组与喜热阻和喜温组的比值作为温度指标; 根据孢粉母体植物对湿度的适应性, 分为湿生组、旱生组和中生组, 利用湿生组与湿生阻和旱生组的比值作为湿度指标(刘占红等, 2007)。分别计算沙河街组和东营组各亚段各生态组的平均含量和每个盖片的平均个数的基础上计算温度指标和湿度指标, 据此恢复了各个时期的气候干-湿、冷-热和气候带条件。孢粉分析表明, 沙一下亚段沉积期, 孢粉以松粉、杉粉、麻黄粉、榆粉、枫香粉、栎粉、

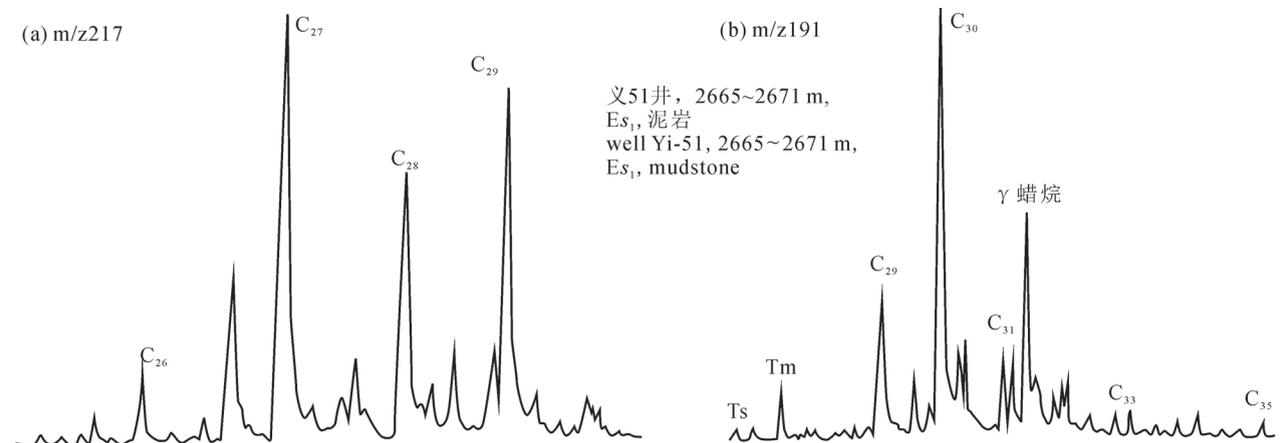


图 6 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段烃源岩甾烷、藿烷特征

Fig. 6 Sterane and terpane characteristics of hydrocarbon source rocks in the lower  $Es_1$  in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

唇形三沟粉为主,气候为北亚热带至暖温带中等偏干旱气候。

气候变化控制着降雨量、蒸发水量,从而控制着河水注入以及沉积物供应,进一步影响着湖平面的变化(王冠民和林国松, 2012),对烃源岩的发育具有重要的控制作用。与烃源岩发育关系尤为密切的是适当的温度条件和适宜的湿度条件,孢粉、藻类组合所代表的植物群类型是敏感的古气候标志,可以指示古环境的温度和湿度变化(刘占红等, 2007),前人利用孢粉资料对渤海湾盆地的古气候条件已经进行了系统恢复(徐长贵等, 2005),研究表明渤海湾盆地古近纪处于暖温带至亚热带,气候变化的总趋势是由暖变冷,由亚热带到温带过渡的特征。沾化凹陷沙四上亚段和沙三下亚段烃源岩发育时期均为暖热湿润的气候条件,说明温暖湿润的气候条件对湖相优质烃源岩发育的重要控制作用。气候对有机质保存的作用体现在温暖湿润的气候环境形成较高的初始生产力,而较高的初始生产力形成的大量富有机质沉积大量消耗底层水中的氧,是形成还原环境的基础;而沙一下亚段沉积期,气候为北亚热带至暖温带中等偏干旱气候,温度相比沙三下亚段沉积期有所下降,气候偏干旱,但水体较深(>80 m),说明沙一下亚段沉积期气候因素不是烃源岩形成的主要原因。

### 3.3 古盐度分析

古盐度是指记录在古代沉积物中的古代水体的盐度,可作为分析地质历史时期沉积环境特征的一个重要标志(Bohacs et al., 2000; 李进龙和陈东敬, 2003)。目前比较常用的古盐度指标是  $w(Sr)/w(Ba)$  值(孙耀庭等, 2015a),划分标准为: $w(Sr)/w(Ba) < 0.6$  为淡水环境; $0.6 \leq w(Sr)/w(Ba) < 1$  为半咸水环境; $w(Sr)/w(Ba) \geq 1$  为咸水环境。分别对孤南洼陷,孤北洼陷和渤南洼陷沙一下亚段共 65 块岩芯样品进行微量元素分析,测试结果表明,孤南洼陷 Sr 含量为 31~133  $\mu\text{g/L}$ , Ba 的含量为 26~72  $\mu\text{g/L}$ ,绝大多数样品落入咸水环境区,少量样品落入半咸水环境区;孤北洼陷 Sr 含量为 32~120  $\mu\text{g/L}$ , Ba 的含量为 32~83  $\mu\text{g/L}$ ,落入咸水环境区和落入半咸水环境区的样品数相当;渤南洼陷 Sr 含量为 30~69  $\mu\text{g/L}$ , Ba 的含量为 41~82  $\mu\text{g/L}$ ,绝大多数样品落入半咸水环境区,少量样品落入咸水环境区(图 7)。这说明孤南洼陷古盐度最高,孤北洼陷次之,渤南洼陷古盐度最小。

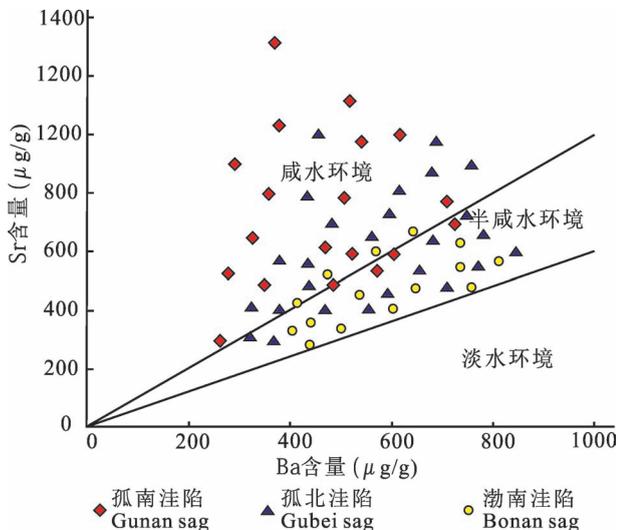


图 7 济阳坳陷沾化凹陷沙一下亚段  $w(Sr)/w(Ba)$  图解  
Fig. 7  $w(Sr)/w(Ba)$  Graphic of the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

### 3.4 水体封闭性分析

水体分层对有机质保存最为有利,是形成优质烃源岩的必要条件,水体分层又分为盐度分层和温度分层 2 种类型。统计表明在盐度较高的湖侵体系容易发生水体的分层,相应地有机质最发育。这种特征在岩芯的垂向变化上也表现得很明显,图 8 是桩 31 井的一个准层序,中下部发育页岩、油页岩,有机质含量高,上部为浅水条件下的钙质泥岩、泥质白云岩,反映气候的 Na/Al 指标下部小,上部大,中间有一个跳跃,代表随水体变浅,蒸发作用迅速增强;盐度指标从上向下逐渐增加,在旋回的底部达到

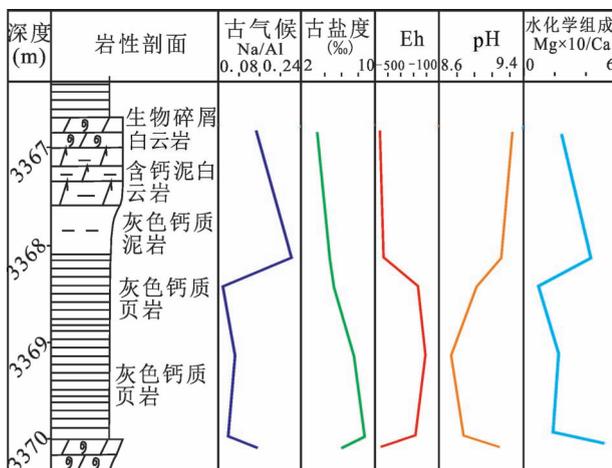


图 8 具有明显水体分层的准层序沉积特征(桩 31 井)  
Fig. 8 Sediment characteristics of parasequence of water column stratification (the Well Zhuang-31)

最高点,代表沉积时深水区盐度大,浅水区盐度小,具有盐度分层的基本特征;相应地,由于水体停滞使底部水体贫氧,氧化还原电位 Eh 值向下呈跳跃式迅速增加;由于有机质的腐烂分解,使水体的 pH 值则呈跳跃式迅速降低,这 2 者都与水体的停滞有关;水化学性质也有很大的变化。上述特征反映了一个典型的分层湖水的沉积特点,其中的数据跳跃点,代表了水体沉积时的盐跃层,这种特征在沾化凹陷沙一下亚段远离物源区相当常见。

### 3.5 古生产力和保存条件

地层中藻类化石的高含量通常被作为高生产力和湖盆水体发育的标志(刘传联和徐金鲤, 2002; 米立军等, 2004),故根据实际资料对藻类化石所占的百分含量,进行了统计,用来反映古湖泊生产力和古湖盆水体的发育情况。统计结果显示,沾化凹陷对应于沙四上亚段、沙三下亚段和沙一下亚段 3 套烃源岩发育时期,藻类含量均为高值,反映了这 3 套地层沉积时均具较高的古生产力。

有机质的聚集和保存是形成优质源岩的另一要素,沉积有机质只有在缺氧条件下才能保存下来(金强等, 2008)。陆相湖盆中,水体由盐度和温度形成的分层可导致缺氧环境形成,其中盐湖或咸化湖水体在重力下形成上下盐度不一致,易形成长久的分层现象(金强等, 2008)。因此了解沉积介质何时发生咸化,咸化的程度如何有助于分析水体的分层状态,以判断有机质所处的保存条件如何。

湖泊的盐度也随着湖盆类型的变化而变化。在微量元素中,硼元素对古盐度的反映很敏感。采用沃克(Walker)法计算硼元素的相当量,通过 Adams 大量分析所得的回归方程  $Y = 0.977X - 7.043$ , Y 为水介质的古盐度(‰), X 为黏土岩中的当量 B( $\times 10^{-6}$ ),进行计算,获得泥岩沉积时的水介质盐度。计算表明,沙一早期古湖泊硼元素含量(72~80) $\times 10^{-6}$ ,硼相当量大于  $200 \times 10^{-6}$ ,计算古盐度平均值为 11.86‰。结合前述  $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$  元素比值分析结果和伽马蜡烷含量在沙一段沉积期达到最高值,说明沙一早期水体最咸化,故其水体分层最稳定,有利于有机质的保存。

## 4 讨论

烃源岩形成的控制因素对湖盆沉积作用的制约是互相关联的,沙一下亚段源岩发育是

处于沾化凹陷的第一稳定热沉降阶段,沉降速率明显小于沙四上亚段和沙三下亚段两个主沉降期,应该不具备高沉降速率形成的深水还原环境。而且沙一下亚段气候相比沙三下亚段明显偏干旱,而沙一段断层活动速率相比沙三下亚段也要小的多,但是沙一下亚段烃源岩品质比沙三下亚段要好的多,横向比较来看,构造沉降速率最高、烃源岩最厚的渤南洼陷沙一下亚段烃源岩品质最差,而构造沉降速率最小、烃源岩最薄的孤南洼陷沙一下亚段烃源岩品质最好,也与我们对烃源岩的认识存在矛盾。这说明气候和构造沉降不是沙一下亚段优质烃源岩形成的主要原因,其形成应与湖盆咸化有关。咸化环境烃源岩中中低等水生生物来源有机质大量存在,有机质源自浮游植物、低栖植物和细菌微生物。沙一下亚段烃源岩有机质呈纹层状分布,生物生长过程中的穿层构造多见,这种特征与海洋环境中的底栖蓝藻细菌的生长特征非常一致,此外沙一下亚段黄铁矿丰度很高,颗粒细小,常成层分布,也表明沙一下亚段高盐环境中易形成水体的密度分层和富  $\text{H}_2\text{S}$  的底水环境,有利于有机质的保存和优质烃源岩的形成。袁文芳等(2006)在渤海湾盆地古近纪发现海百合茎、海胆刺、硅藻和丰度极高的  $\text{C}_{30}4\alpha$ -甲藻甾烷等,牟晓慧等(2007)在歧口凹陷沙一段发现砾石灰岩,葛瑞全等(2003)在车镇凹陷的沙一段底部发现了原生海绿石,分子化石表现出 Pr/Ph 值低( $< 0.9$ )、伽马蜡烷含量高且变化较大、4-甲基甾烷丰富的特征;笔者等在沾化凹陷见到了原生海绿石(图 9a、b)和胶磷矿(图 9c—f),也进一步说明了沾化凹陷沙一下亚段沉积普遍遭受了海水影响。对 15 个海绿石样品中子探针分析(表 3)表明其为陆相湖泊中水介质条件与海水介质相近的背景下形成的自生海绿石,其化学成分与标准海相海绿石相似,反映沉积时半咸水的古水介质条件。与全球海平面升降曲线对比也表明,沙一早期与鲁佩期的海平面上升相对应(Haq et al., 1987; 袁文芳等, 2006),这些都表明渤海湾盆地沙一沉积早期经历过强烈海侵。

表 3 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段海绿石中子探针分析结果

Table 3 Neutron probe analysis results of glauconite in the the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

样品来源	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
标准海相海绿石	49.58	8.41	21.59	/	3.75	0.51	0.55	7.11	8.12
渤南洼陷	50.04	12.20	14.20	/	4.15	0.47	0.35	5.87	9.75

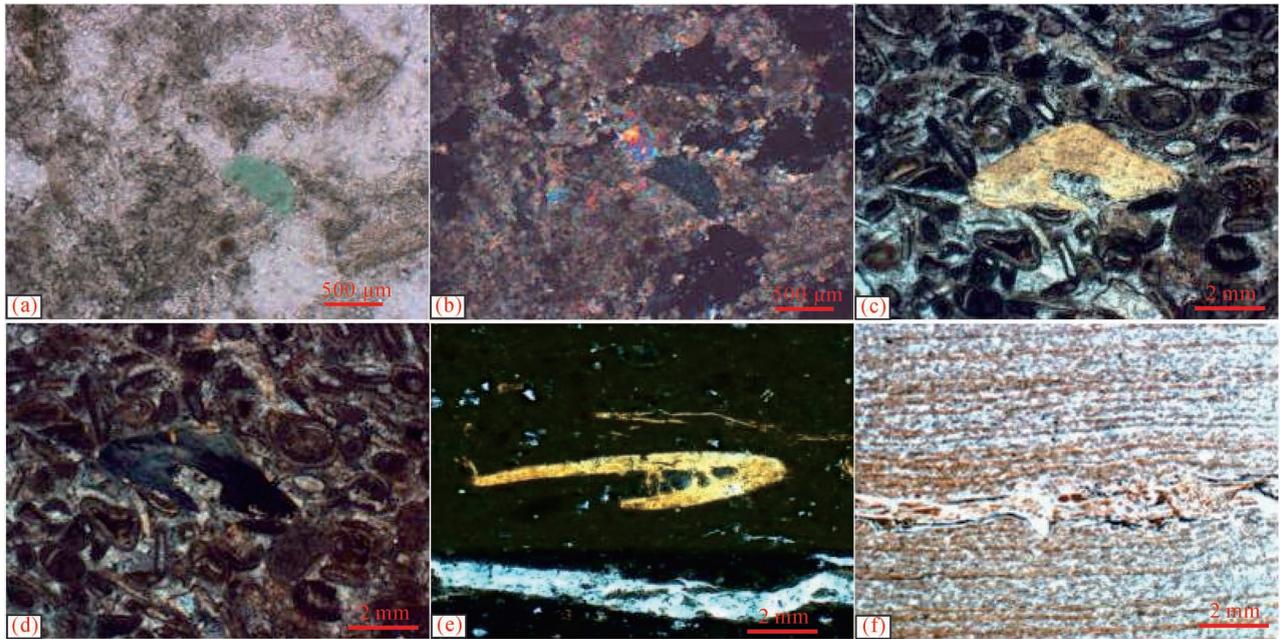


图 9 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段海绿石及胶磷矿显微镜下特征

Fig. 9 Microscopical characteristics of glauconite and collophanite in the the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression (a, b) 白云岩中椭圆状海绿石(罗 30 井,1669.60 m,×200, (a) 单偏光,(b) 正交偏光); (c, d) 鲕粒灰岩中的胶磷矿(虎 15 井,1385.26 m,×40, (c) 单偏光, (d) 正交光); (e) 泥晶灰岩中的胶磷矿(孤南 27, 2158.24 m,×100, 单偏光); (f) 泥岩中的碎屑状胶磷矿(义 60 井, 3018.70 m,×40, 单偏光)

(a, b) dolomite with elliptic glauconite, the Well Luo-30,1669.60 m, ×200; (a) plane polarized light, (b) perpendicular polarized light; (c, d) collophanite in oolitic limestone, the Well Hu-15,1385.26 m, ×40; (c) plane polarized light; (d) perpendicular polarized light; (e) collophanite in micritic limestone, the Well Gunan-27, 2158.24m, ×100, perpendicular polarized light; (f) clastic collophanite in mudstone, the Well Yi-60, 3018.70 m, ×40, plane polarized light

在缺乏物源注入的前提下, B、Ga 含量主要与其本身的化学活动性有关, 受沉积环境和成岩作用的影响较小, 所以 B/Ga 值是沾化凹陷沙一下亚段相对较好的古盐度指标(王冠民等, 2005b)。为使古盐度横向上具有较好的可对比性, 选择沙一下亚段最大湖泛面及其向下 10 m 作为对比层位, 为尽量减少古物源和古湖泊表层淡化水体的影响选择处于各洼陷沉积中心和远离物源的半深湖或深湖相泥页岩, 在渤南洼陷、孤北洼陷和孤南洼陷分别选 1 口典型井, 每口井取 8 个不同深度样品, 分别测其 B、Ga 含量, 计算 B/Ga 值, 测试结果见表 4。

从表 4 分析数据来看, 位于渤南洼陷的新义深 9 井 B/Ga 为 6.38 ~ 7.35, 平均值为 6.89; 而孤北洼陷桩 25 井实测的 B/Ga 为 6.95 ~ 7.59, 平均值 7.26, 略高于渤南洼陷; 但孤南

洼陷孤南 132 井的 B/Ga 为 7.73 ~ 8.53, 平均值为 8.11, 明显高于渤南洼陷和孤北洼陷。由此可见, 孤南洼陷是沾化凹陷沙一下亚段盐度最大的区域, 这

表 4 济阳拗陷沾化凹陷沙一下亚段钻井古盐度分析数据

Table 4 Data of palaeosalinity ratio in the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, Jiyang Depression

井号	深度(m)	岩石名称	B/Ga	深度(m)	岩石名称	B/Ga
新义深 9	2900.7	棕灰色水平纹层泥岩	6.87	2910.5	浅灰色泥岩	6.58
	2903.1	灰褐色油页岩	7.19	2913.3	黄褐色油泥岩	7.17
	2907.8	深灰色泥岩	6.78	2916.6	深灰色泥岩	6.78
	2909.4	浅褐色油页岩	7.35	2717.9	浅灰色钙质泥岩	6.38
桩 25	3278.4	深灰色泥岩	6.95	3290.4	深灰色灰质油泥岩	7.59
	3280.3	棕褐色油页岩	7.39	3292.8	深灰色泥岩	7.36
	3284.2	灰褐色灰质油泥岩	7.53	3294.5	深灰色灰质油泥岩	7.18
	3286.0	深灰色泥岩	6.98	3296.3	深灰色泥岩	7.06
孤南 132	3275.6	深灰色钙质泥岩	7.98	3288.2	棕褐色灰质油泥岩	8.42
	3279.6	棕褐色灰质油泥岩	8.09	3292.3	棕褐色灰质油泥岩	8.53
	3283.3	深灰色钙质泥岩	7.85	3295.6	棕褐色灰质油泥岩	8.32
	3285.8	深灰色钙质泥岩	7.73	3298.5	深灰色钙质泥岩	7.94

注: 元素 B 由国家地质实验测试中心测试, 元素 Ga 由廊坊物化探研究所测试。

也与  $w(\text{Sr})/w(\text{Ba})$  值结论一致,所以沾化凹陷沙一下亚段海侵是沿孤南洼陷—孤北洼陷—渤南洼陷的方向进行的。高盐度导致湖泊的高生产力和良好的水体分层,是导致孤南洼陷烃源岩品质最好的主要原因。

沙三段到沙一段沉积时期,渤海湾地区气候没有明显变化,构造沉降速率逐渐降低,在这种情况下出现第三纪以来最大的海侵,说明这是一次能量强大而时间短暂的强海啸事件,这种海啸可能来自较大天体对附近洋面的撞击的一种灾变事件,如果较大星体撞入太平洋西部,就有可能产生波及大陆纵深甚至全球性的特大海啸,在沾化凹型形成了沙一下亚段这一套优质烃源岩。

## 5 结论与启示

(1) 沾化凹陷沙一下亚段发育一套优质烃源岩,由油页岩与油泥岩互层构成,优质烃源岩分布在渤南洼陷、孤南洼陷和孤北洼陷,烃源岩沉积厚度渤南洼陷>孤北洼陷>孤南洼陷,烃源岩品质孤南洼陷>孤北洼陷>渤南洼陷。孤北洼陷和孤南洼陷烃源岩部分达到成熟阶段,对浅层油气成藏具有一定的贡献。

(2) 古生物学标志、地球化学标志分析表明,鲁佩期海侵导致湖泊的高生产力和良好的水体分层是沙一下亚段优质烃源岩的主要成因,海侵方向沿孤南洼陷—孤北洼陷—渤南洼陷推进,导致烃源岩品质与沉积中心分布存在明显差异。

## 参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈建渝,牛瑞卿,李水福,田波,魏世平. 2002. 济阳拗陷孤南洼陷低熟油成藏特征. 地球科学, 27(4): 435~440.

陈中红,查明,金强. 2004. 东营凹陷牛38井沙河街组烃源岩生排烃评价. 地质科学, 39(3): 356~366.

方旭庆,蒋有录,罗霞,赵兰全,杨永红. 2013. 济阳拗陷断裂演化与油气富集规律. 中国石油大学学报:自然科学版, 37(2): 21~27.

葛瑞全,宋传春,淳萍,王如良,张多文,徐洪泽. 2003. 济阳沾一车凹陷古近系沙河街组海侵的再认识. 高校地质学报, (93): 450~456.

姜雪,邹华耀,庄新兵,田金强,杨元元. 2010. 辽东湾地区烃源岩特征及其主控因素. 中国石油大学学报(自然科学版), 43(2): 31~37.

金强,朱光有,王娟. 2008. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(4): 19~22.

李进龙,陈东敬. 2003. 古盐度定量研究方法综述. 油气地质与采收

率, 10(5): 1~3.

李丕龙. 2004. 济阳拗陷“富集有机质”烃源岩及其资源潜力. 地学前缘, 11(1): 317~322.

李守军,王明镇,郑德顺,赵秀丽. 2003. 山东济阳拗陷古近纪的气候恢复. 山东科技大学学报(自然科学版), 22(3): 6~9.

李伟,吴智平,周瑶琪,郑德顺,侯旭波. 2006. 沾化凹陷东北部中新世盆地演化过程研究. 煤田地质与勘探, 34(3): 20~23.

刘传联,徐金鲤. 2002. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例. 沉积学报, 20(1): 144~150.

刘培,蒋有录,刘华,熊伟,李克成,朱荣伟. 2013. 渤海湾盆地沾化凹陷断层活动与新近系油气成藏关系. 天然气地球科学, 24(3): 541~547.

刘占红,李思田,辛仁臣,徐长贵,程建春. 2007. 地层记录中的古气候信息及其与烃源岩发育的相关性——以渤海黄河口凹陷古近系为例. 地质通报, 26(7): 830~840.

柳忠泉,韩立国,徐佑德,许世红,任凤楼,周丽. 2008. 济阳拗陷新生代热演化特征研究. 地质学报, 82(5): 663~668.

罗群,卫建荣. 2008. 测井组合识别——地震联合反演法预测薄层生物灰岩——以沾化凹陷孤北斜坡区沙一段底部为例. 石油天然气学报, 30(2): 103~107.

米立军,毕力刚,龚胜利,吴国瑄,覃军干,邵磊,夏佩芬. 2004. 渤海新近纪古湖发育的直接证据. 海洋地质与第四纪地质, 24(2): 37~42.

苗建宇,祝总祺,刘文荣,卢焕勇. 2003. 济阳拗陷古近系—新近系泥岩孔隙结构特征. 地质论评, 49(3): 330~336.

牟晓慧,董兆雄,张建,李会慎,李宏军. 2007. 歧口凹陷沙一段颗粒石灰岩的发现及其环境意义. 西南石油大学学报, 29(5): 45~47.

彭存仓. 2009. 沾化凹陷断层活动性及其叠合特征. 油气地质与采收率, 16(5): 37~39.

邱楠生,李善鹏,曾澹辉. 2004. 渤海湾盆地济阳拗陷热历史及构造—热演化特征. 地质学报, 78(2): 263~269.

渠芳,连承波,陈清华,渠冬芳. 2011. 济阳拗陷孤岛油田西南缘油气运聚方向研究. 地质论评, 57(2): 223~233.

孙耀庭,徐守余,张世奇,刘军,徐昊清,郭丽丽. 2015a. 昌潍拗陷淮北凹陷孔二段优质烃源岩成因与分布. 地质论评, 61(3): 587~598.

孙耀庭,徐守余,张世奇,刘金华,巩建强,孟涛,李辉. 2015b. 沾化凹陷多元供烃成藏特征及成藏模式. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(6): 42~49.

王冠民,林国松. 2012. 济阳拗陷古近纪的古气候区分析. 矿物岩石地球化学通报, 31(5): 505~509.

王冠民,任拥军,钟建华,马在平,姜在兴. 2005a. 济阳拗陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨. 地质学报, 79(6): 834~838.

王冠民,钟建华,姜在兴,操应长. 2005b. 从济阳拗陷沙一段古盐度的横向变化看古近纪的海侵方向. 世界地质, 24(3): 243~247.

王广利. 2010. 济阳拗陷古近纪分子古生物及其沉积环境. 中国石油大学学报:自然科学版, 34(3): 8~11.

徐长贵,许效松,丘东洲,赖维成,周心怀. 2005. 辽东湾地区辽西凹陷中南部古近系构造格架与层序地层格架及古地理分析. 古地理学报, 7(4): 449~459.

鄢继华,张鹏,陈世悦,张明军. 2007. 沾化凹陷断拗转换期层序地层及沉积特征. 新疆石油地质, 28(4): 465~467.

袁文芳,陈世悦,曾昌民. 2006. 济阳拗陷古近系沙河街组海侵问题研究. 石油学报, 27(4): 40~44.

张存霞. 2015. 基于岩石薄片分析的介形类化石赋存状态及地质意义——以济阳拗陷始新统泥页岩为例. 地质论评, 61(6): 1407

~1416.

- 张林晔, 孔祥星, 张春荣, 周文, 徐兴友, 李政. 2003. 济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义. *地球化学*, 32(1): 35~42.
- 钟建华, 李勇, 邵珠福, 陈彬, 倪良田, 肖淑明, 赵海燕, 王书宝, 饶孟余, 刘圣鑫, 郝兵, 孙宁亮, 毛鑫, 李聪, 田媛, 林刚山. 2015. 东营凹陷古近纪沙三中期中超深水湖泊的研究. *高校地质学报*, 21(2): 320~327.
- Bohacs K M, Carroll A R, Neal J E, Mankiewicz P J. 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character. an integrated sequence-stratigraphic geochemical framework. In: Gierlowski-Kordesch E H, Kelts K R. eds. *Lake Basins through Space and Time*. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, 46: 3~34.
- Chen Jianyu, Niu Ruiqing, Li Shuifu, Tian Bo, Wei Shiping. 2002&. Characteristics of oil reservoir of low-mature oil in Gunan Sag, Jiyang Depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(4): 435~440.
- Chen Zhonghong, Zha Ming, Jin Qiang. 2004&. An investigation on generation and expulsion of hydrocarbon from source rocks of the Shahejie Formation in the Well Niu-38, Dongying Depression. *Chinese Journal of Geology*, 39(3): 356~366.
- Fang Xuqing, Jiang Youlu, Luo Xia, Zhao Lanquan, Yang Yonghong. 2013&. Relationship between faults evolution and hydrocarbon enrichment in Jiyang depression. *Journal of China University of Petroleum*, 37(2): 21~27.
- Ge Ruiquan, Song Chuanchun, Chun Ping, Wang Ruliang, Zhang Duowen, Xu Hongze. 2003&. Restudy on the Shahejie Formation transgression of the paleocene in Zhan-Che Sag ( Jiyang Depression). *Geological Journal of China Universities*, (93): 450~456.
- Hao Fang, Zhou Xinhuai, Zhu Yangming, Yang Yuanyuan. 2009. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo uplift, Bohai Bay basin, China. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 93: 1015~1037.
- Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. 1987. Mesozoic and Cenozoic sea-level chronostratigraphy and cycles of sea level change//Wilgus C K, Hastings B J, Posamentier, et al. *Sea-level change: An Integrated approach*. SEPM Special Publication, 42: 71~108.
- Jiang Xue, Zou huayao, Zhuang Xinbing, Tian Jinqiang, Yang Yuanyuan. 2010&. Characteristics of hydrocarbon source rocks in Liaodong Bay area and its main controlling factors. *Journal of China University of Petroleum*, 43(2): 31~37.
- Jin Qiang, Zhu Guangyou, Wang Juan. 2008&. Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments. *Journal of China University of Petroleum*, 32(4): 19~22.
- Li Jinlong, Chen Dongjing. 2003#. A summary of quantitative research methods of paleosalinity. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 10(5): 1~3.
- Li Pilong. 2004&. The organic-rich hydrocarbon source rocks and their resource potentials in Jiyang Depression. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 317~322.
- Li Shoujun, Wang Mingzhen, Zheng Deshun, Zhao Xiuli. 2003&. Recovery of climate of palaeogene in Jiyang Depression of Shandong. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 22(3): 6~9.
- Li Wei, Wu Zhiping, Zhou Yaoqi, Zheng Deshun, Hou Xubo. 2006&. Evolutionary analysis of Mesozoic and Cenozoic basins in northeastern Zhanhua Sag. *Coal Geology & Exploration*, 34(3): 20~23.
- Liu Chuanlian, Xu Jinli. 2002&. Estimation method on productivity of oil-producing lake and a case study. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 144~150.
- Liu Pei, Jiang Youlu, Liu Hua, Xiong Wei, Li Kecheng, Zhu Rongwei. 2013&. The relationship between fault-activity and hydrocarbon accumulation of Neogene in Zhanhua Depression, Bohai Bay Basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(3): 541~547.
- Liu Zhanhong, Li Sitian, Xin Renchen, Xu Changgui, Cheng Jianchun. 2007&. Paleoclimatic information in stratigraphic records and its relation to the formation of hydrocarbon source rocks—a case study of the Paleogene strata in the Huanghekou subbasin of the Bohai Bay Basin, China. *Geological Bulletin of China*, 26(7): 830~840.
- Liu Zhongquan, Han Liguo, Xu Youde, Xu Shihong, Ren Fenglou, Zhou Li. 2008&. Cenozoic geothermal evolution in the Jiyang Depression. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 663~668.
- Luo Qun, Wei Jianrong. 2008&. Predicting biolimestone in thin layer by using the method of logging combination recognition—joint seismic inversion. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(2): 103~107.
- Mi Lijun, Bi Ligang, Gong Shengli, Wu Guoxuan, Qin Jungan, Shao Lei, Xia Peifen. 2004&. Direct evidence for development of Bohai paleolake during the Neogene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(2): 37~42.
- Miao Jianyu, Zhu Zongqi, Liu Wenrong, Lu Huanyong. 2003&. Characteristics of pore structures of Paleogene—Neogene argillaceous rocks in the Jiyang Depression. *Geological Review*, 49(3): 330~336.
- Mou Xiaohui, Dong Zhaoxiong, Zhang Jian, Li huishen, Li Hongjun. 2007#. The finding of coccolith limestone and its environment significance in Qikou Depression in Shahejie Member. *Journal of Southwest Petroleum University*, 29(5): 45~47.
- Peng Cuncang. 2009#. Analysis of fault activity and structural type in Zhanhua Depression. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 16(5): 37~39.
- Qiu Nansheng, Li Shanpeng, Zeng Jianhui. 2004&. Thermal history and tectonic—thermal evolution of the Jiyang Depression in the Bohai Bay Basin, East China. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 263~269.
- Qu Fang, Lian Chengbo, Chen Qinghua, Qu Dongfang. 2011&. Research on the direction of hydrocarbon migration and accumulation in the southwest part of Gudao oilfield, Jiyang Depression. *Geological Review*, 57(2): 223~233.
- Sun Yaoting, Xu Shouyu, Zhang Shiqi, Liu Jun, Xu Haoqing, Guo Lili. 2015a&. Characteristic and distribution of high-quality source rocks of the second member of Kongdian Formation, Eocene, in Weiwei Sag, Changwei Depression. *Geological Review*, 61(3): 587~598.
- Sun Yaoting, Xu Shouyu, Zhang Shiqi, Liu Jinhua, Gong Jianqiang, Meng Tao, Li Hui. 2015b&. Reservoir characteristics and reservoir-forming model of multi-element hydrocarbon supply in Zhanhua Sag. *Journal of China University of Petroleum*, 39(6): 42~49.
- Wang Guanmin, Lin Guosong. 2012&. Eocene paleoclimate zone study in the Jiyang Depression. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 31(5): 505~509.
- Wang Guanmin, Ren Yongjun, Zhong Jianhua, Ma Zaiping, Jiang Zaixing. 2005a&. Genetic analysis on lamellar calcite veins in paleogene black shale of the Jiyang Depression. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 834~838.
- Wang Guanmin, Zhong Jianhua, Jiang Zaixing, Cao Yingchang. 2005b&. Possible transgressive channel in paleogene deduced by lateral change of paleosalinity in first member of Shahejie Formation in Jiyang Depression. *Global Geology*, 24(3): 243~247.

Wang Guangli. 2010&. Molecular paleontology and its depositional environment during the Eocene Jiyang Depression, China. *Journal of China University of Petroleum*, 34(3): 8~11.

Xu Changgui, Xu Xiaosong, Qiu Dongzhou, Lai WeiCheng, Zhou Xinhuai. 2005&. Structural and sequence stratigraphic frameworks and palaeogeography of the Paleogene in central—southern Liaoxi Sag, Liaodongwan Bay Area. *Journal of Palaeogeography*, 7(4): 449~459.

Yan Jihua, Zhang Peng, Chen Shiyue, Zhang Mingjun. 2007&. Sequence stratigraphy and sedimentary response of fault-depression transform period in Zhanhua Sag. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(4): 465~467.

Yuan Wenfang, Chen Shiyue, Zeng Changmin. 2006&. Study on marine transgression of Paleogene Shahejie Formation in Jiyang Depression.

*Acta Petrolei Sinica*, 27(4): 40~44.

Zhang Cunxia. 2015&. Ostracod fossil occurrence in thin sections and its geological significance case study on Eocene shale of Jiyang Depression. *Geological Review*, 61(6): 1407~1416.

Zhang Linye, Kong Xiangxing, Zhang Chunrong, Zhou Wen, Xu Xingyou, Li Zheng. 2003&. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang Depression. *Geochemica*, 32(1): 35~42.

Zhong Jianhua, Li Yong, Shao Zhufu, Chen bin, Ni Liangtian, Xiao Shuming, Zhao Haiyan, Wang Shubao, Rao Mengyu, Liu Shengxin, Hao Bing, Sun Ningliang, Mao Cui, Li Cong, Tian Yuan, Lin Gangshan. 2015&. The ultr-water lake of Middle Sha-3 Formation during Paleogene in Dongying Sag, NE China. *Geological Journal of China Universities*, 21(2): 320~327.

## Origin analysis of high-quality source rocks in the lower Es<sup>1</sup> of Zhanhua Sag, Jiyang Depression

GONG Hongbo<sup>1)</sup>, SUN Yaoting<sup>2)</sup>, LIU Jing<sup>3)</sup>, LI Hui<sup>3)</sup>

1) *Geophysical Research Institution of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong, 257015;*

2) *College of Architecture Engineering, Binzhou University, Binzhou, Shandong, 256600;*

3) *Geo-Science Research Institution of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong, 257015*

**Objectives:** The Zhanhua Sag developed three sets of source rocks, which include the upper Es<sup>4</sup> (the 4th Member of the Eocene Shahejie Formation), the lower Es<sup>3</sup> and the lower Es<sup>1</sup> (i.e. the 4th, 3rd and 1st Member of the Eocene Shahejie Formation). There have been a few studies on source rocks of the lower Es<sup>1</sup> before.

**Methods:** Analyzed source rocks qualities of the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag by using organic geochemical methods.

**Results:** the result shows that source rocks of the lower Es<sup>1</sup> had high abundance of organic matter, which kerogen are mainly type I, are high-quality hydrocarbon source rocks. Source rocks deposited center is located in the Bonan Sub sag, but best quality source rocks situated in the Gunan Sub sag. Part of the hydrocarbon source rocks are in mature stage in the Gubei Sub sag and the Gunan Sub sag, so exploration and development research should pay attention to contribution of the lower Es<sup>1</sup> hydrocarbon source rocks. Depositional environments analysis showed that tectonic subsidence rate was smaller and the climate was the north subtropical to warm temperate middle arid climate during sedimentary period of the lower Es<sup>1</sup> in the Zhanhua Sag, didn't support the formation of high-quality hydrocarbon source rocks. High productivity and good water column caused by high salinity was the main reason of the formation of high-quality hydrocarbon source rocks in the lower Es<sup>1</sup>. High salinity was due to marine transgression in Lupen.

**Conclusions:** Marine transgressed along the direction of the Gunan Sub sag—Gubei Sub sag—Bonan Sub sag, caused the Gunan Sub sag had best quality source rocks though it was not sedimentary center and sedimentation center.

**Keywords:** high-quality source rocks; the lower Es<sup>1</sup> (the 1st Member of the Eocene Shahejie Formation); depositional environments; paleoclimate; marine transgression; Zhanhua Sag, Jiyang Depression

**Acknowledgements:** This research is supported by the National Major Project (No.: 2011ZX05006-003)

**First author:** GONG Hongbo, male, born in 1980, engineer, mainly engaged in mineral survey and exploration, Email: gonghongbo.slyt@sinopec.com

**Corresponding author:** SUN Yaoting, male, born in 1978, senior engineer, mainly engaged in research of petroleum geology, Email: syt1979@sina.com

Manuscript received on: 2018-09-08; Accepted on: 2019-03-20; Edited by: LIU Zhiqiang

**Doi:** 10.16509/j.georeview.2019.03.009